

JP 2014-54438 A 2014.3.27

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-54438

(P2014-54438A)

(43) 公開日 平成26年3月27日(2014.3.27)

(51) Int.Cl. F 1 テーマコード (参考)  
A 6 1 N 5/10 (2006.01) A 6 1 N 5/10 Q 4 C 0 8 2

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2012-201783 (P2012-201783) (22) 出願日 平成24年9月13日 (2012. 9. 13)	(71) 出願人 301032942 独立行政法人放射線医学総合研究所 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 (74) 代理人 100064414 弁理士 磯野 道造 (74) 代理人 100111545 弁理士 多田 悦夫 (72) 発明者 水島 康太 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内 (72) 発明者 古川 卓司 千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内
---	--

最終頁に続く

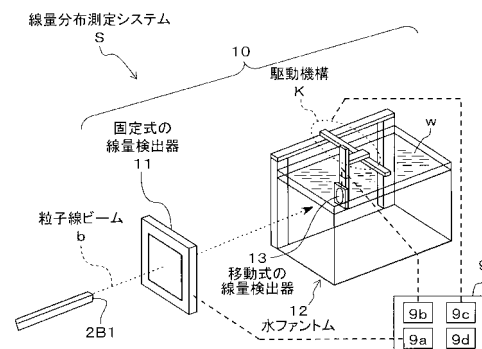
(54) 【発明の名称】 線量分布測定システムおよびその線量分布測定方法

## (57) 【要約】

【課題】短時間で位置分解能の高い線量分布データを測定可能な線量分布測定システムおよびその線量分布測定方法を提供する。

【解決手段】本発明の線量分布測定システムは、粒子線ビームbの照射方向に対してファントム12の上流に設置され粒子線ビームbの線量を検出する第1の線量検出器11と、粒子線ビームbの線量を検出する第2の線量検出器13と、第2の線量検出器13を移動させるための駆動機構Kと、第2の線量検出器13の位置を監視する位置監視手段9cと、第1・第2の線量検出器11、13からの各線量情報および第2の線量検出器13の位置を示す位置情報が入力される線量計算手段9dとを備え、線量計算手段9dは、第2の線量検出器13からの線量情報を第1の線量検出器11からの線量情報を基に校正し、第2の線量検出器13の位置情報を用いてファントム12内の位置に対する粒子線ビームbの線量分布データを算出している。

【選択図】図2



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

照射された粒子線ビームの生体組織を模したファントム内での線量分布を測定するための線量分布測定システムであって、

前記粒子線ビームの照射方向に対して前記ファントムの上流に設置され前記粒子線ビームの線量を検出する第 1 の線量検出器と、

前記ファントム内を移動しつつ前記粒子線ビームの線量を検出する第 2 の線量検出器と、

該第 2 の線量検出器を移動させるための駆動機構と、

前記第 2 の線量検出器の位置を監視する位置監視手段と、

前記第 1 の線量検出器および前記第 2 の線量検出器からの各線量情報および前記位置監視手段からの前記第 2 の線量検出器の位置を示す位置情報が入力される線量計算手段とを備え、

前記線量計算手段は、

前記第 2 の線量検出器からの線量情報を前記第 1 の線量検出器からの線量情報を基に校正し、前記第 2 の線量検出器の位置情報を用いて前記ファントム内の位置に対する前記粒子線ビームの線量分布データを算出する

ことを特徴とする線量分布測定システム。

**【請求項 2】**

照射された粒子線ビームの生体組織を模したファントム内での線量分布を測定するための線量分布測定システムであって、

前記粒子線ビームの照射方向に対して前記ファントムの上流に設置され前記粒子線ビームの線量を検出する第 1 の線量検出器と、

前記ファントム内を移動しつつ前記粒子線ビームの線量を検出する第 2 の線量検出器と、

該第 2 の線量検出器を移動させるための駆動機構と、

前記第 2 の線量検出器の位置を監視する位置監視手段と、

前記第 1 の線量検出器および前記第 2 の線量検出器からの各線量を示す出力信号がアナログ信号処理装置を介してデジタル信号とされ受信されるとともに前記位置監視手段からの前記第 2 の線量検出器の位置を示す信号が受信されるデジタル信号処理計算機とを備え

前記デジタル信号処理計算機は、前記第 1 および前記第 2 の線量検出器からの各線量を示す信号を用いて、前記第 2 の線量検出器からの線量情報を前記第 1 の線量検出器からの線量情報を基に校正し、前記第 2 の線量検出器の位置を示す信号を用いて前記ファントム内の位置に対する前記粒子線ビームの線量分布データを算出する

ことを特徴とする線量分布測定システム。

**【請求項 3】**

前記駆動機構は、前記粒子線ビームの進行方向に沿った第 1 の方向と、前記粒子線ビームの進行方向に垂直な第 2 の方向と、前記第 1 の方向および前記第 2 の方向に垂直な第 3 の方向との少なくとも何れかの方向に、前記第 2 の線量検出器を移動させる

ことを特徴とする請求項 1 または請求項 2 に記載の線量分布測定システム。

**【請求項 4】**

粒子線ビームの照射方向に対して前記ファントムの上流に設置される第 1 の線量検出器と、前記ファントム内を移動する第 2 の線量検出器と、該第 2 の線量検出器を移動させるための駆動機構と、前記第 2 の線量検出器の位置を監視する位置監視手段と、線量計算手段とを備え、照射された前記粒子線ビームの生体組織を模したファントム内での線量分布を測定する線量分布測定システムの線量分布測定方法であって、

前記第 1 の線量検出器は、前記前記粒子線ビームの線量を検出し、

前記第 2 の線量検出器は、前記駆動機構により移動されながら前記粒子線ビームの線量を検出し、

10

20

30

40

50

前記位置監視手段は、前記第 2 の線量検出器の位置を示す位置情報を出力し、  
前記線量計算手段は、

移動しつつある前記第 2 の線量検出器の位置情報、および、前記第 1 および前記第 2 の線量検出器からのそれぞれの線量情報を取得し、

前記第 2 の線量検出器からの線量情報を前記第 1 の線量検出器からの線量情報を基に校正し、前記位置情報により前記ファントム内の位置に対する前記粒子線ビームの線量分布データを算出する

ことを特徴とする線量分布測定システムの線量分布測定方法。

【請求項 5】

粒子線ビームの照射方向に対して前記ファントムの上流に設置される第 1 の線量検出器と、前記ファントム内を移動する第 2 の線量検出器と、該第 2 の線量検出器を移動させるための駆動機構と、前記第 2 の線量検出器の位置を監視する位置監視手段と、デジタル信号処理計算機とを備え、前記照射された粒子線ビームの生体組織を模したファントム内における線量分布を測定する線量分布測定システムの線量分布測定方法であって、

前記第 1 の線量検出器は、前記粒子線ビームの線量を検出し、

前記第 2 の線量検出器は、前記駆動機構により移動されながら前記粒子線ビームの線量を検出し、

前記位置監視手段は、移動しつつある前記第 2 の線量検出器の位置を示す信号を、前記デジタル信号処理計算機に出力し、

前記アナログ信号処理装置は、前記第 1 および前記第 2 の線量検出器からのそれぞれの線量を示す出力信号を、デジタル信号に変換して前記デジタル信号処理計算機に出力し、

前記デジタル信号処理計算機は、前記第 2 の線量検出器からの線量の情報を前記第 1 の線量検出器からの線量の情報を基に校正し、前記第 2 の線量検出器の位置を示す信号を用いて前記ファントム内の位置に対する前記粒子線ビームの線量分布データを算出する

ことを特徴とする線量分布測定システムの線量分布測定方法。

【請求項 6】

前記駆動機構は、前記第 2 の線量検出器を、前記粒子線ビームの進行方向に沿った第 1 の方向と、前記粒子線ビームの進行方向に垂直な第 2 の方向と、前記第 1 の方向および前記第 2 の方向に垂直な第 3 の方向との少なくとも何れかの方向に移動させる

ことを特徴とする請求項 4 または請求項 5 に記載の線量分布測定システムの線量分布測定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数の駆動軸に沿って移動する水ファントム内の線量検出器を用いた粒子線の線量分布測定を行う線量分布測定システムおよびその線量分布測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

粒子線照射装置において、円環状の加速器内を高速で移動させ高エネルギーまで加速した荷電粒子を物質に照射すると、図 8 に示すように、荷電粒子(陽子線や重粒子線)は物質内を進みながら徐々にそのエネルギーを失い減速し、停止する直前で進行方向の単位長さあたりの放出エネルギーが最大となる。このピークは、ブラックピークと称される。図 8 は、放射線の種類による深部線量百分率曲線を比較した模式図である。

【0003】

この特性を利用したのが陽子線・重粒子線治療であり、従来の放射線治療で問題となる体表面付近の正常組織への損傷を極力抑えながら、体内深くにある腫瘍であっても大きな線量を与えることを可能としている。

体の正常組織の損傷を抑えつつ腫瘍に大きな線量を与えるには、体内の位置ごとに付与される線量を正確に評価することが重要であり、体内に入射した荷電粒子ビームの線量分布を測定する必要がある。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 0 4 】

照射される荷電粒子ビームの体内における線量分布を調べるためには、線量検出器を水中に沈めた水ファントム装置（特許文献１の図３、図４の密閉水槽参照）を使用する。この装置では、複数の駆動軸を有する駆動機構に取り付けられた線量検出器（特許文献１のセンサ４６）を用いて、図９（ａ）に示すように、水ｗの中に沈んだ線量検出器１０１を水ファントム１０２内を移動させ、停止してはビームｂ１０１の照射を行い線量測定を繰り返すことで、三次元の水ファントム１０２の空間内の任意の位置での線量が測定可能である。

## 【 0 0 0 5 】

なお、図９（ａ）は、水ファントム１０２の水ｗ中で線量検出器１０１を移動させ停止させては線量測定を繰り返す状態を側方から見た図であり、図９（ｂ）は、図９（ａ）の測定方法で測定データを示すグラフであり、横軸に深さ位置をとり、縦軸に線量をとっている。

図９（ａ）では、線量検出器１０１をビームｂ１０１の方向に沿った水ファントム１０２の水ｗの深さが深くなる方向に移動させ、線量測定を行った場合を示している。

## 【 先行技術文献 】

## 【 特許文献 】

## 【 0 0 0 6 】

【 特許文献１ 】 特開平 １ １ - ６ ４ ５ ３ ０ 号 公 報 ( 図 ３ 、 図 ４ 参 照 )

## 【 発明の概要 】

## 【 発明が解決しようとする課題 】

## 【 0 0 0 7 】

しかしながら、特許文献１などの従来の装置と方法で得られる線量分布データは、図９（ｂ）に示すように、三次元位置ごとの不連続な測定データである。上述した如く、図９は、線量検出器１０１をビームｂ１０１の方向に沿った水ファントム１０２の水ｗの深さが深くなる方向に移動させた場合を示している。

## 【 0 0 0 8 】

そのため、測定点間の線量は、理論計算やシミュレーション計算結果、内挿や最小自乗法、回帰法などのフィッティング等を用いて補間する必要がある。つまり、測定点間の線量が予測になってしまうという欠点がある。

## 【 0 0 0 9 】

そこで、正確な線量分布データを得るためには、測定点間隔を十分に狭くする必要がある。そのため、水ファントム１０２内で線量検出器１０１の移動と停止での線量測定を繰り返す従来の測定方法では、測定する領域が大きくなるほど膨大な測定時間が費やされるという問題がある。

## 【 0 0 1 0 】

本発明は、短時間で位置分解能の高い線量分布データを測定可能な線量分布測定システムおよびその線量分布測定方法を提供することを目的とする。

## 【 課題を解決するための手段 】

## 【 0 0 1 1 】

上記目的を達成するべく、第１の本発明に関わる線量分布測定システムは、照射された粒子線ビームの生体組織を模したファントム内での線量分布を測定するための線量分布測定システムであって、前記粒子線ビームの照射方向に対して前記ファントムの上流に設置され前記粒子線ビームの線量を検出する第１の線量検出器と、前記ファントム内を移動しつつ前記粒子線ビームの線量を検出する第２の線量検出器と、該第２の線量検出器を移動させるための駆動機構と、前記第２の線量検出器の位置を監視する位置監視手段と、前記第１の線量検出器および前記第２の線量検出器からの各線量情報および前記位置監視手段からの前記第２の線量検出器の位置を示す位置情報が入力される線量計算手段とを備え、前記線量計算手段は、前記第２の線量検出器からの線量情報を前記第１の線量検出器からの線量情報を基に校正し、前記第２の線量検出器の位置情報を用いて前記ファントム内の位置に対する前記粒子線ビームの線量分布データを算出している。

## 【 0 0 1 2 】

第 4 の本発明に関わる線量分布測定システムの線量分布測定方法は、第 1 の本発明の線量分布測定システムを実現する方法である。

## 【 0 0 1 3 】

第 1 または第 4 の本発明によれば、ファントム内の位置に対して連続的な粒子線ビームの線量分布データを、高位置分解能でかつ迅速に得られる。

## 【 0 0 1 4 】

第 2 の本発明に関わる線量分布測定システムは、照射された粒子線ビームの生体組織を模したファントム内での線量分布を測定するための線量分布測定システムであって、前記粒子線ビームの照射方向に対して前記ファントムの上流に設置され前記粒子線ビームの線量を検出する第 1 の線量検出器と、前記ファントム内を移動しつつ前記粒子線ビームの線量を検出する第 2 の線量検出器と、該第 2 の線量検出器を移動させるための駆動機構と、前記第 2 の線量検出器の位置を監視する位置監視手段と、前記第 1 の線量検出器および前記第 2 の線量検出器からの各線量を示す出力信号がアナログ信号処理装置を介してデジタル信号とされ受信されるとともに前記位置監視手段からの前記第 2 の線量検出器の位置を示す信号が受信されるデジタル信号処理計算機とを備え、前記デジタル信号処理計算機は、前記第 1 および前記第 2 の線量検出器からの各線量を示す信号を用いて、前記第 2 の線量検出器からの線量情報を前記第 1 の線量検出器からの線量情報を基に校正し、前記第 2 の線量検出器の位置を示す信号を用いて前記ファントム内の位置に対する前記粒子線ビームの線量分布データを算出している。

## 【 0 0 1 5 】

第 5 の本発明に関わる線量分布測定システムの線量分布測定方法は、第 2 の本発明の線量分布測定システムを実現する方法である。

## 【 0 0 1 6 】

第 2 または第 5 の本発明によれば、ファントム内の位置に対して連続的な粒子線ビームの線量分布データを、高位置分解能でかつ迅速に得られる。

## 【 0 0 1 7 】

第 3 の本発明に関わる線量分布測定システムは、第 1 または第 2 の本発明において、前記駆動機構は、前記粒子線ビームの進行方向に沿った第 1 の方向と、前記粒子線ビームの進行方向に垂直な第 2 の方向と、前記第 1 の方向および前記第 2 の方向に垂直な第 3 の方向との少なくとも何れかの方向に、前記第 2 の線量検出器を移動させている。

## 【 0 0 1 8 】

第 6 の本発明に関わる線量分布測定システムの線量分布測定方法は、第 3 の本発明の線量分布測定システムを実現する方法である。

## 【 0 0 1 9 】

第 3 または第 6 の本発明によれば、第 2 の線量検出器を任意の方向に移動させることが可能である。

## 【 発明の効果 】

## 【 0 0 2 0 】

本発明に係わる線量分布測定システムおよびその線量分布測定方法によれば、位置分解能の高い線量分布データを短時間で測定可能である。

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 0 2 1 】

【 図 1 】 粒子線照射装置 T を用いて患者の腫瘍に粒子線を照射している状態を示す概念図。

【 図 2 】 実施形態の線量分布測定システム S の構成を示す斜視図。

【 図 3 】 線量分布測定装置の水ファントム廻りを拡大して示す拡大斜視図。

【 図 4 】 線量分布測定制御装置と、固定式の線量検出器、移動式の線量検出器、および駆動機構との信号の授受を示すブロック図。

【 図 5 】 水ファントム内での移動式の線量検出器を深さ方向に移動しつつある状態を示す

10

20

30

40

50

図 3 の A 方向矢視断面図。

【図 6】実施形態の線量分布測定システムでの線量分布の測定のシーケンスにおけるデジタル信号処理を示すフロー図。

【図 7】線量分布測定システムで測定した水ファントム内の水の深さ方向の線量分布を示す図。

【図 8】放射線の種類による深部線量百分率曲線を比較した模式図。

【図 9】(a) は水ファントムの水中で線量検出器を移動させ停止させては線量測定を繰り返す状態を側方から見た図であり、(b) は(a) の測定方法で測定データを示すグラフ。

【発明を実施するための形態】

【0022】

10

以下、本発明の実施形態について添付図面を参照して説明する。

図 1 は、粒子線照射装置 T を用いて患者の腫瘍に粒子線を照射している状態を示す概念図である。図 1 では、粒子線照射装置 T を上方から見た状態を示している。

【0023】

本発明の実施形態の線量分布測定システムを適用する粒子線照射装置 T は、典型的な粒子線照射装置である。粒子線照射装置 T は、電子を除去した陽子、炭素、シリコン、アルゴンなどの荷電粒子を高速に加速して陽子線、重粒子線の粒子線として、スキャンング照射などで照射対象の患部(患者の腫瘍)に所定線量照射する装置である。

なお、炭素、シリコン、アルゴンなどの質量が大きな各イオンは重粒子と呼称される。

【0024】

20

粒子線照射装置 T は、炭素などの原子から電子を除きイオン(荷電粒子)を供給する入射ビーム輸送ライン 2 A と、該荷電粒子を高エネルギーまで加速し粒子線(陽子線、重粒子線)のビームとして周回させるシンクロトロン 1 と、シンクロトロン 1 から取り出した粒子線のビームを輸送する出射ビーム輸送ライン 2 B とを具備している。

【0025】

なお、実際の粒子線照射装置 T には、図 1 に示す機器に加え、シンクロトロン 1 の線量を測定するビームプロファイルモニタ、出射ビーム輸送ライン 2 B の粒子線ビーム b の線量を測定するビームプロファイルモニタなどがあるが、図 1 では割愛している。

【0026】

粒子線照射装置 T の制御は、図示しない制御手段によって行われる。制御手段は、コンピュータ、各種回路、つまりインターフェース回路、アクチュエータ回路、センサ回路、電源回路などで構成される。

30

【0027】

< 入射ビーム輸送ライン 2 A >

入射ビーム輸送ライン 2 A は、イオン源 2 a と線形加速器 2 b と入射セプタム電磁石 2 c とを有している。

イオン源 2 a では、炭素、シリコン、アルゴンなどの原子から電子の一部を除去し、荷電粒子を創成する。

線形加速器 2 b では、イオン源 2 a で電子の一部が取り除かれた荷電粒子を加速し、炭素の薄膜を通して残りの電子を全部除去する。

40

【0028】

入射セプタム電磁石 2 c は、入射ビーム輸送ライン 2 A の上流を通過した入射ビーム(荷電粒子)をシンクロトロン 1 の周回軌道の向きに磁場に起因する力によって変更する。この際、入射セプタム電磁石 2 c は、入射ビームとシンクロトロン 1 の周回軌道を周回する蓄積ビームとの間を反磁性体のセプタム板(銅板など)で区切り、シンクロトロン 1 を周回する蓄積ビームに影響を及ぼさないようにしている。

【0029】

< シンクロトロン 1 >

シンクロトロン 1 は、環状に構成され、粒子線のビームに付与する加速高周波電場の周期を粒子回転周期に同期させることにより、陽子や重粒子などの荷電粒子を高エネルギーま

50

で加速する。そのため、シンクロトロン 1 は「加速器」に相当する。

【 0 0 3 0 】

シンクロトロン 1 は、主要構成機器として、静電インフレクタ 3 と高周波加速空洞 4 と偏向電磁石 5 と四極電磁石 6 と静電デフレクタ 7 とを備えている。

静電インフレクタ 3 は、入射ビーム輸送ライン 2 A から送られるビーム(荷電粒子)を、電場によってシンクロトロン 1 の周回軌道に偏向させる。

高周波加速空洞 4 は、シンクロトロン 1 内の荷電粒子を加速または減速するための高周波電場を発生させる。

【 0 0 3 1 】

具体的には、高周波加速空洞 4 は、制御手段により、シンクロトロン 1 内に高周波電力を投入することにより、荷電粒子が加速ギャップ(図示せず)に差し掛かった際に、丁度加速または減速されるように高周波加速空洞 4 内に発生させる高周波電圧の位相と荷電粒子の位置とを同期させて、荷電粒子にエネルギーを供給する。これにより、荷電粒子にエネルギーが供給され、荷電粒子の加速または減速が行われる。

【 0 0 3 2 】

偏向電磁石 5 は、シンクロトロン 1 内を進む粒子線のビームを周回軌道に保つための磁場を付与する。

四極電磁石 6 は、磁界の強弱により、シンクロトロン 1 の周回軌道上における粒子線のビームの広がりを収束させたり、当該ビームの狭まりを発散させる。

静電デフレクタ 7 は、シンクロトロン 1 を周回する粒子線のビームを、電場によって外側に蹴りだして出射ビーム輸送ライン 2 B に向けて出射する。

【 0 0 3 3 】

その他、図示しないが、シンクロトロン 1 には、ビームのベータトロン振動の三次共鳴を励起し、位相空間上で安定周回領域と共鳴領域を分割・形成するセバトロクス生成用六極電磁石や、クロマティシティ補正用六極電磁石、周回軌道を進行するビームに水平方向(図 1 の紙面方向)かつ垂直方向(図 1 の紙面に垂直方向)にベータトロン振動に共鳴する周波数変調および振幅変調された R F - K O 電圧による電場を印加して周回軌道を進む粒子線のビームの幅を広げる R F - K O 電極などが設けられる。

【 0 0 3 4 】

<シンクロトロン 1 からの粒子線の取り出し>

図 1 に示すシンクロトロン 1 内の周回軌道を周回している多数の粒子(荷電粒子)は、水平方向(図 1 の紙面方向)または鉛直方向(図 1 の紙面に垂直方向)に振動しながら周回している。この振動をベータトロン振動といい、ベータトロン振動は、四極電磁石 6 などにより制御している。

【 0 0 3 5 】

シンクロトロン 1 内の周回軌道を周回する粒子(荷電粒子)は、高周波加速空洞 4 によって加速され最大エネルギーに達する。その後、粒子線のビームに R F - K O 電極を用いて R F - K O 電圧による電場を印加することによりベータトロン振幅を増大させる。そして、シンクロトロン 1 内で周回している多数の粒子(荷電粒子)の一部を、静電デフレクタ 7 を用いて、出射ビーム輸送ライン 2 B へ向けて出射させる。

【 0 0 3 6 】

詳細には、シンクロトロン 1 内の粒子線のビームをシンクロトロン 1 外の出射ビーム輸送ライン 2 B に向けて取り出すため、シンクロトロン 1 の管の中心付近に分布する粒子線のビームに、その周回軌道に対し垂直かつ水平方向に R F - K O 電極で挟んで R F - K O 電圧による電場を印加する。これにより、粒子線のビームサイズを水平方向(図 1 の紙面方向)に広げる。この粒子の出射は、シンクロトロン 1 内の周回軌道を進む粒子(荷電粒子)のベータトロン振動の共鳴を利用して行われる。

【 0 0 3 7 】

すなわち、R F - K O 電極は、シンクロトロン 1 の周回軌道を進むビームに対して、周回軌道に垂直(図 1 の紙面に垂直方向)かつ水平方向(図 1 の紙面方向)に、ベータトロン振

10

20

30

40

50

動に共鳴する周波数変調および振幅変調されたRF-KO電圧による電場を印加し、周回軌道を進む粒子線のビームの幅を広げる。これにより、粒子線のビームの一部を静電デフレクタ7の電極間に入れる。

#### 【0038】

なお、RF-KO電圧がオフのときには、この粒子のビームサイズの増加が止まるために、粒子線が静電デフレクタ7から取り出されなくなるので、出射ビーム輸送ライン2Bへの照射を止めることが可能となる。

出射ビーム輸送ライン2Bには、出射セプタム電磁石2dは、出射輸送ライン2Bに入った粒子線のビーム(荷電粒子)を磁界に起因する力によって出射ビーム輸送ライン2Bに沿った方向に変更する。

10

#### 【0039】

出射ビーム輸送ライン2Bの下流には、ビーム照射ポート2B1が接続され、ビーム照射ポート2B1により、照射室において照射対象(治療台上の患者の腫瘍)に、取り出した粒子線(陽子線や重粒子線)ビームbを照射する。

#### 【0040】

##### <線量分布測定システムS>

本実施形態(本発明)の線量分布測定システムSは、粒子線照射装置Tのビーム照射ポート2B1から出射される粒子線(陽子線や重粒子線)ビームbの線量の分布を測定するシステムである。

図2は、実施形態の線量分布測定システムSの構成を示す斜視図である。図3は、線量分布測定装置10の水ファントム12廻りを拡大して示す拡大斜視図である。

20

#### 【0041】

本実施形態の線量分布測定システムSは、線量分布測定装置10と、後記する信号処理フローを行う線量分布測定制御装置9とを具備し構成されている。

線量分布測定装置10は、ビーム照射ポート2B1から出射される粒子線ビームbの元の線量を検出する校正用の固定される固定式の線量検出器11と、水wの中で駆動機構Kによって移動される移動式の線量検出器13が設けられる水ファントム12とを備えている。水ファントム12は、水が人の生体組織を模したものであることから、用いられる。

なお、校正用の固定式の線量検出器11は、出射ビーム輸送ライン2B内に設けてもよい。

30

#### 【0042】

移動式の線量検出器13は、水ファントム12内を移動しつつ人体を模した水wの中の粒子線ビームbの線量を測定することで、粒子線の線量の分布を測定する。

そこで、水ファントム12内の水wの中を移動式の線量検出器13を移動させるべく、駆動機構Kが水ファントム12の外郭に設けられた支持構造12a、12a(図3参照)に取り付けられている。なお、駆動機構Kの深さ方向駆動機構K1を水ファントム12の外郭の深さ方向に延在する面に沿って設けられる支持構造12a、12aに取り付けることで、直方体状の水ファントム12の外郭の深さ方向に延在する面と、駆動機構Kの深さ方向駆動機構K1の軸方向とを一致させることができ、水ファントム12の外郭の深さ方向に延在する面に垂直な他の2面と水平・垂直方向駆動機構K2、K3の軸方向とを一致させることができる。

40

#### 【0043】

駆動機構Kは、移動式の線量検出器13を、粒子線ビームbに沿った深さ方向(図3のX方向)に移動させる深さ方向駆動機構K1と、粒子線ビームbに垂直な水平方向(図3のY方向)に移動させる水平方向駆動機構K2と、粒子線ビームbに沿った深さ方向(図3のX方向)および水平方向(図3のY方向)に垂直な方向(図3のZ方向)に移動させる垂直方向駆動機構K3とを有している。

#### 【0044】

深さ・水平・垂直方向駆動機構K1、K2、K3は、それぞれステッピングモータや、

50



ウォームギア、ウォームホイール、ラック、ピニオンなどの回転運動を直線運動に変換する減速機構を用いて構成される。

なお、深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1、K 2、K 3 は、これ以外にコイルを直線方向(X・Y・Z 方向)に並べ、流す電流を切り換えることで直線方向(X・Y・Z 方向)に移動させるリニアモータを使用して実現してもよい。

【0045】

駆動機構 K は、深さ方向駆動機構 K 1 の固定スライド部 K 1 1 が、支持構造 1 2 a、1 2 a の上端部に固定されている。深さ方向駆動機構 K 1 は、固定スライド部 K 1 1 に対して、深さ方向(図 3 の X 軸方向)に可動部 K 1 2 がスライド自在に取り付けられている。

水平方向駆動機構 K 2 は、深さ方向駆動機構 K 1 の可動部 K 1 2 に対して、水平方向(図 3 の Y 軸方向)にスライド自在に取り付けられている。

垂直方向駆動機構 K 3 は、水平方向駆動機構 K 2 に対して、垂直方向(図 3 の Z 軸方向)にスライド自在に取り付けられている。

【0046】

線量分布測定制御装置 9 の駆動制御装置 9 c (図 4 参照)から制御信号を駆動機構 K のモータに送信し、深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1、K 2、K 3 をそれぞれ稼働させることで、移動式の線量検出器 1 3 を、水ファントム 1 2 内の水 w の中で 3 次元の所望の位置に配置させることができる。

【0047】

< 粒子線ビーム b の軸と水ファントム 1 2 の駆動機構 K の深さ方向の軸(図 3 の X 軸)との位置・角度調整 >

ビーム照射ポート 2 B 1 から出射される粒子線ビーム b の正確な線量分布を測定するために、ビーム照射ポート 2 B 1 からの粒子線ビーム b の軸と水ファントム 1 2 の深さ方向の軸(図 3 の駆動機構 K の深さ方向駆動機構 K 1 の軸(X 軸))との位置・角度誤差を小さくするため、以下の調整が行われる。

ビーム照射ポート 2 B 1 の軸と水ファントム装置 1 2 の深さ方向の軸(図 3 の駆動機構 K の深さ方向駆動機構 K 1 の軸(X 軸))とは、セオドライトやレーザー水準器などを用いた測量により精密にアライメント(一直線状に)調整される。

【0048】

また、ビーム照射ポート 2 B 1 に設置されている不図示のビーム位置モニタも同様に、ビーム照射ポート 2 B 1 の軸にアライメント調整されている。

さらに、ビーム照射ポート 2 B 1 から出射される粒子線ビーム b は、ビーム位置モニタでそのビーム重心が測定され、ビーム照射ポート 2 B 1 の軸に対してビーム軌道が中心にくるようにステアリング電磁石などで調整される。

【0049】

その結果、粒子線ビーム b の入射軸と水ファントム装置 1 2 の深さ方向の軸(駆動機構 K の深さ方向駆動機構 K 1 の軸(図 3 の X 軸))とが精密にアライメントされる。

これにより、ビーム照射ポート 2 B 1 からの粒子線ビーム b の軸と水ファントム装置 1 2 の軸(駆動機構 K の深さ方向駆動機構 K 1 の軸(図 3 の X 軸))とは精密に一致させられる。

【0050】

< 線量分布測定制御装置 9 >

図 4 は、線量分布測定制御装置 9 と、固定式の線量検出器 1 1、移動式の線量検出器 1 3、および駆動機構 K との信号の授受を示すブロック図である。

線量分布測定制御装置 9 は、水ファントム 1 2 内の水 w の中の粒子線ビーム b の線量分布を測定するための制御を担う装置である。

【0051】

線量分布測定制御装置 9 は、アナログ信号処理装置 9 a とアナログ信号処理装置 9 b と駆動制御装置 9 c とデジタル信号処理計算機 9 d とを備えている。

アナログ信号処理装置 9 a は、固定式の線量検出器 1 1 からアナログ信号を受信し、粒

10

20

30

40

50

子線ビーム b の原線量 (元の線量) を測定するための装置である。

【 0 0 5 2 】

アナログ信号処理装置 9 a は、線量検出器 1 1 からの線量を示す電流信号を電圧信号に変換した後、デジタル信号に変換し、デジタル信号処理計算機 9 d に出力する。

アナログ信号処理装置 9 a は、線量を表す電流信号を電圧信号に変換する I / V 変換回路、A / D ・ D / A 変換器などを有している。

【 0 0 5 3 】

アナログ信号処理装置 9 b は、移動式の線量検出器 1 3 からアナログ信号を受信し、水ファントム 1 2 内の水 w 中の粒子線ビーム b の線量を測定するための装置である。アナログ信号処理装置 9 b は、線量検出器 1 3 からの線量を示す電流信号を電圧信号に変換した後、デジタル信号に変換し、デジタル信号処理計算機 9 d に出力する。

10

【 0 0 5 4 】

アナログ信号処理装置 9 b は、線量を表す電流信号を電圧信号に変換する I / V 変換回路、A / D ・ D / A 変換器などを有している。

アナログ信号処理装置 9 a 、 9 b は、それぞれ線量を表す電流を、パルス信号に変換するパルス信号発生回路を有する構成としてもよい。

【 0 0 5 5 】

駆動制御装置 9 c は、制御信号を駆動機構 K のモータに送信し、深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1 、 K 2 、 K 3 をそれぞれ稼働させることで、水ファントム 1 2 内の水 w の中で移動式の線量検出器 1 3 を制御信号で指示した位置に配置させる。つまり、駆動制御装置 9 c は、デジタル信号処理計算機 9 d からの駆動指令を受信し、深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1 、 K 2 、 K 3 のモータに駆動制御信号を出力する。

20

【 0 0 5 6 】

また、駆動制御装置 9 c は、深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1 、 K 2 、 K 3 により移動した移動式の線量検出器 1 3 の位置を検出する。つまり、駆動制御装置 9 c は、モータの回転速度を表すアナログ信号をパルス信号に変換し、デジタル信号処理計算機 9 d に出力する。

駆動制御装置 9 c は、駆動機構 K のモータを稼働するアクチュエータ制御回路、深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1 、 K 2 、 K 3 での移動式の線量検出器 1 3 の位置を表す信号を変換するロータリーエンコーダ、A / D ・ D / A 変換器などを有している。

30

【 0 0 5 7 】

移動式の線量検出器 1 3 の位置は、駆動機構 K のモータの回転速度 (回転数) の信号から、デジタル信号処理計算機 9 d で、各深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1 、 K 2 、 K 3 の減速比を用いて求めることとしている。或いは、回転速度 (回転数) に代えて、位置を示す光、うず電流、超音波の変化などから位置を検出する位置センサを、深さ・水平・垂直方向駆動機構 K 1 、 K 2 、 K 3 にそれぞれ設けて移動式の線量検出器 1 3 の位置を検知する構成としてもよい。この場合、駆動制御装置 9 c は位置センサからのセンサ信号の増幅回路を有する。

【 0 0 5 8 】

デジタル信号処理計算機 9 d は、ソフトウェア処理を実行するコンピュータであり、線量分布測定システム S において、水ファントム 1 2 内の水 w 中の粒子線ビーム b の線量分布の測定の処理を司る装置である。

40

デジタル信号処理計算機 9 d は、R O M (Read Only Memory) などのメモリに格納されるソフトウェア、つまり C 言語などで記述されたプログラムを実行することで、処理が遂行される。

【 0 0 5 9 】

< 線量分布の測定 >

線量分布測定システム S では、図 1 に示す粒子線照射装置 T から照射される粒子線ビーム b を、水ファントム 1 2 内で複数の駆動軸 (図 3 の X 、 Y 、 Z 軸方向) を有する駆動機構 K により移動する移動式の線量検出器 1 3 を用いて、三次元の水ファントム 1 2 の空間で

50

の線量分布を、リアルタイムでデジタル処理して測定する。

【 0 0 6 0 】

この際、図 2 に示すように、水ファントム 1 2 の上流に設置された固定式の線量検出器 1 1 で線量を測定しながら、駆動制御装置 9 c によって水ファントム 1 2 内を移動している移動式の線量検出器 1 3 の位置情報も同時に得ることで、後記の図 6 に示す信号処理フローを介して、粒子線ビーム b の線量分布データの取得を行う。

【 0 0 6 1 】

図 5 は、水ファントム 1 2 内で移動式の線量検出器 1 3 を深さ方向(図 3 の X 軸方向)に移動しつつある状態を示す図 3 の A 方向矢視断面図である。

以下で説明するのは、図 5 に示すように、移動式の線量検出器 1 3 を駆動機構 K の深さ方向駆動機構 K 1 で、水ファントム 1 2 内の水 w 中で深さ方向(X 方向)に移動させた場合のビーム照射ポート 2 B 1 から出射される粒子線ビーム b の水ファントム 1 2 内の水 w の中での線量分布である。

【 0 0 6 2 】

次に、デジタル信号処理計算機 9 d における粒子線ビーム b の三次元の水ファントム 1 2 の空間での線量分布の測定の処理について、図 6 に従って説明する。

図 6 は、実施形態の線量分布測定システム S での線量分布の測定のシーケンスにおけるデジタル信号処理を示すフロー図である。

デジタル信号処理計算機 9 d によるデジタル信号処理は、図 6 のフロー図のようにして行われる。

【 0 0 6 3 】

まず、デジタル信号処理計算機 9 d は、駆動制御装置 9 c に、水ファントム 1 2 内での粒子線ビーム b の線量分布を測定するために移動式の線量検出器 1 3 を初期位置から距離  $X_0$  まで動かすように駆動指令を出力する(図 6 の S 1 0 1)。

次に、デジタル信号処理計算機 9 d は、変数 i に“ 0 ”を設定する(図 6 の S 1 0 2)。

【 0 0 6 4 】

その後、デジタル信号処理計算機 9 d は、駆動制御装置 9 c からの現在の移動式の線量検出器 1 3 の位置 X の情報と、アナログ信号処理装置 9 a からの固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y の情報と、アナログ信号処理装置 9 b からの移動式の線量検出器 1 3 の線量 Y' の情報とを読み込む(取得する)(図 6 の S 1 0 3)。

【 0 0 6 5 】

そして、デジタル信号処理計算機 9 d は、固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y が既定の閾値  $Y_0$  以上か否か判定する(図 6 の S 1 0 4)。ここで、デジタル信号処理計算機 9 d は、固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y を示す信号の信号雑音比(S/N 比)やアナログ - デジタル変換での分解能を考慮して、固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y に閾値  $Y_0$  を設定し、線量 Y が閾値  $Y_0$  以上の場合のみ以降の演算を行うようにしている。

【 0 0 6 6 】

S 1 0 4 で、固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y が閾値  $Y_0$  以上でないと判定された場合(S 1 0 4 で No)、S 1 0 3 に移行し、X、Y、Y' の情報を読み込む。なお、X、Y、Y' の情報は、時間で同期をとることができる。

一方、S 1 0 4 で、固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y が閾値  $Y_0$  以上と判定された場合(S 1 0 4 で No)、デジタル信号処理計算機 9 d は、

$i = i + 1$ 、 $D_i = Y' / Y$ 、 $Z_i = X$  の演算を行う。

【 0 0 6 7 】

ここで、“ $i = i + 1$ ”は測定数を演算している。

“ $D_i = Y' / Y$ ”は、測定された移動式の線量検出器 1 3 の線量 Y' を測定された固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y で除算し、水ファントム 1 2 内の水 w 中の粒子線ビーム b の線量を校正している。何故なら、粒子線ビーム b の線量は時間変動するので、固定式の線量検出器 1 1 の線量 Y で、移動式の線量検出器 1 3 で測定した線量の校正を行うこととしている。

10

20

30

40

50

“ $Z_i = X$ ”は、測定時の移動式の線量検出器 13 の移動距離  $X$  を後に線量の情報と結びつけるため、 $i$  回目の移動式の線量検出器 13 の移動距離  $X$  を変数  $Z_i$  に設定している (S 105)。

#### 【0068】

続いて、デジタル信号処理計算機 9d は、 $A_i = (D_i + D_{i-1} + D_{i-2} + \dots + D_{i-N+1}) / N$  の演算を行う。この演算は、下記の理由で行われるものである。

測定したいデータは、移動式の線量検出器 13 の出力の線量  $Y'$  を固定式の線量検出器 11 の出力の線量  $Y$  で規格化した値  $D$  であるが、信号ノイズやアナログ/デジタル変換 (A/D 変換) 分解能の影響をさらに減らすため、 $D_i$  に直近  $N$  個の移動平均化したものを最終的な値  $A_i$  としている。通常、演算処理速度は移動式の線量検出器 13 の駆動速度に比べて非常に速いため、移動平均化を行っても位置分解能を十分に高く保つことが可能である (図 6 の S 106)。

10

#### 【0069】

続いて、デジタル信号処理計算機 9d は、 $X \geq X_0$  であるか否かを判定する。つまり、移動距離  $X$  が設定した初期位置から距離  $X_0$  に至ったか否かを判定する (図 6 の S 107)。

なお、S 107 では、移動距離  $X$  が設定した初期位置から距離  $X_0$  に至ったか否かを判定するので、 $X = X_0$  を判定してもよいが、処理がループすることがないように、 $X > = X_0$  であるか否かを判定している。

$X > = X_0$  でない、すなわち移動距離  $X$  が設定した初期位置から距離  $X_0$  に至っていないと判定された場合 (図 6 の S 107 で No)、移動式の線量検出器 13 が、図 6 の S 101 で設定した距離  $X_0$  まで移動してないので、図 6 の S 103 に移行し、線量の測定を継続する。

20

#### 【0070】

一方、図 6 の S 107 で、 $X \geq X_0$  である、すなわち移動距離  $X$  が設定した初期位置から距離  $X_0$  に至っていると判定された場合 (図 6 の S 107 で Yes)、デジタル信号処理計算機 9d は、測定データの配列 ( $Z_m, A_m$ ) をファイルに出力する (S 108)。

出力される測定データの配列 ( $Z_m, A_m$ ) の情報は、不図示の表示装置に表示ファイルを用いて表示されたり、不図示のプリンタにより印刷ファイルを用いて印刷される。或いは、測定データの配列 ( $Z_m, A_m$ ) のファイルは他システムにファイル転送して、他システムに送る構成としてもよい。或いは、測定データの配列 ( $Z_m, A_m$ ) の情報は、テキストデータとして、データベースなどの記憶部に記憶する構成としてもよい。

30

#### 【0071】

以上の線量分布測定システム S のデジタル信号処理 (図 6 参照) の結果、図 7 に示す水ファントム 12 内の水  $w$  の深さ位置 (図 5 の  $X$  軸方向) に対する線量の分布が得られる。図 7 は、線量分布測定システム S で測定した水ファントム 12 内の水  $w$  の深さ方向の線量分布を示す図である。なお、図 7 の深さ位置 “0” とは、図 5 の  $X$  軸方向の水ファントム 12 内の水  $w$  の深さ “0” を示す。

#### 【0072】

以上、本実施形態 (本発明) に係わる線量分布測定システム S の構成をまとめると、

40

本実施形態 (本発明) に係わる線量分布測定システム S は、粒子線照射装置 T から水ファントム 12 に照射される粒子線ビーム  $b$  の線量分布を測定するための移動式の線量検出器 13、この移動式の線量検出器 13 を水ファントム 12 内で移動するための複数の駆動軸 (図 3 の  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  軸方向) を有する駆動機構  $K$ 、水ファントム 12 より上流側に設置された照射線量校正用の固定式の線量検出器 11、水ファントム 12 内の移動式の線量検出器 13 の駆動装置を制御・監視する駆動制御装置 9c、固定式・移動式の線量検出器 11、13 とアナログ信号処理装置 9a、9b を介して送受信するとともに駆動制御装置 9c と送受信するデジタル信号処理計算機 9d を備えたものである。

#### 【0073】

粒子線を照射しながら水ファントム 12 内で測定したい軸方向 (図 3 の  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  軸方

50

向)に移動式の線量検出器 13 を駆動制御装置 9 c によって移動することで、デジタル信号処理計算機 9 d は、時間に対して連続的な線量データを照射線量校正用の固定式の線量検出器 11 と水ファントム 12 内の水 w 中の移動式の線量検出器 13 から得られる。同時に、デジタル信号処理計算機 9 d は、移動式の線量検出器 13 の駆動制御装置 9 c から移動式の線量検出器 13 の座標データも取得できる。

【0074】

デジタル信号処理計算機 9 d では、駆動制御装置 9 c から得られる移動式の線量検出器 13 の座標(位置)をモニタしながら、移動式の線量検出器 13 の出力信号を固定式の線量検出器 11 の出力信号で除算して校正した測定線量を高速演算により求めることで、位置分解能が高い線量分布データを短時間で取得する。

10

【0075】

従って、本実施形態の線量分布測定システム S によれば、水ファントム 12 と複数の駆動軸(図 3 の X、Y、Z 軸参照)を有する駆動機構 K に取り付けられた移動式の線量検出器 13 を用いた粒子線の線量分布測定において、位置分解能の高い線量分布データが得られる。

また、短時間で位置分解能が高い線量分布データを取得できる。例えば、従来、30 cm の距離の線量データをとるのに、10 分～20 分かかっていたものが、約 1 分で測定できる。

【0076】

また、水ファントム 12 内の水 w 中で連続的に線量データをとることができ、線量データの取り逃がしがない。これに対し、従来の方法では、間歇的に線量データを測定する方法であったので、前記したように、測定点間の線量が、理論値、シミュレーション、回帰法などのフィッティング等の予測となっていた。しかし、本線量分布測定システム S によれば、連続的に線量データをとることができ、この問題が解消する。

20

【0077】

<その他の実施形態>

なお、前記実施形態では、水ファントム 12 内の水 w の深さ方向(図 3 の X 軸方向)に移動式の線量検出器 13 を移動しつつ、線量を測定する場合を例示したが、図 3 の Y 軸方向または図 3 の Z 軸方向に移動式の線量検出器 13 を移動しつつ、線量を測定してもよいのは勿論である。或いは、図 3 の X 軸および Y 軸方向、または、図 3 の Z 軸および Y 軸方向または、図 3 の X 軸および Z 軸方向、または、図 3 の X 軸および Y 軸および Z 軸方向に、同時に移動式の線量検出器 13 を移動しつつ、測定してもよい。

30

【0078】

或いは、前記実施形態では、粒子線ビーム b の位置を固定して線量を測定する場合を例示したが、粒子線ビーム b の位置を移動しつつ、移動式の線量検出器 13 を移動して、線量を測定してもよい。なお、この場合も、移動式の線量検出器 13 は任意方向に移動できる。

なお、前記実施形態では、水ファントム 12 内の水 w を用いて粒子線ビーム b の線量を測定する場合を例示したが、水 w 以外の生体組織を模した他のファントムを用いて粒子線ビーム b の線量を測定してもよい。

40

【0079】

例えば、水ファントム 12 の水槽を密封容器に変更し気体(例としては組織等価ガスなど)を封入する方法や、水以外の体組織に近い液体、例えば、コロイド溶液などの牛乳を使用してもよい。

【0080】

また、前記実施形態では、線量分布測定システム S では、ソフトウェアを用いて処理を行う場合を例示したが、線量分布測定システム S の機能の少なくとも一部を、IC(Integrated Circuit)、LSI(Large Scale Integration)などのハードウェアを使用して行うように構成してもよい。

【0081】

50

以上、本発明の種々の実施形態を述べたが、その説明は典型的であることを意図している。従って、本発明の範囲内で様々な修正と変更が可能である。すなわち、本発明は発明の趣旨を変更しない範囲において変更可能である。

【符号の説明】

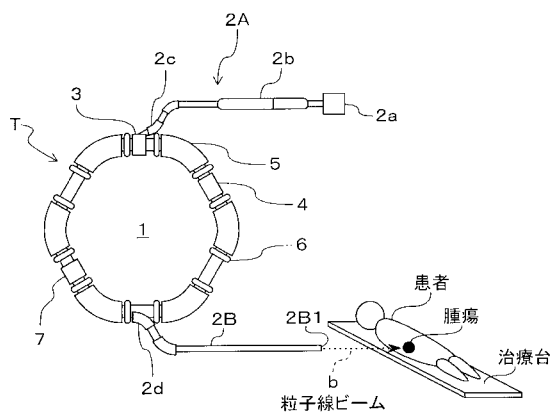
【0082】

- 9 a、9 b アナログ信号処理装置
- 9 c 駆動制御装置(位置監視手段)
- 9 d デジタル信号処理計算機(線量計算手段)
- 1 1 固定式の線量検出器(第1の線量検出器)
- 1 2 水ファントム(ファントム)
- 1 3 移動式の線量検出器(第2の線量検出器)
- b 粒子線ビーム
- K 駆動機構
- K 1 深さ方向駆動機構(駆動機構)
- K 2 水平方向駆動機構(駆動機構)
- K 3 垂直方向駆動機構(駆動機構)
- S 線量分布測定システム
- X(軸の方向) 第1の方向
- Y(軸の方向) 第2の方向
- Z(軸の方向) 第3の方向

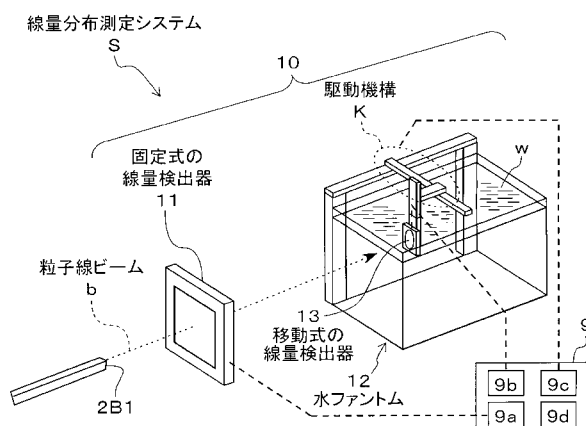
10

20

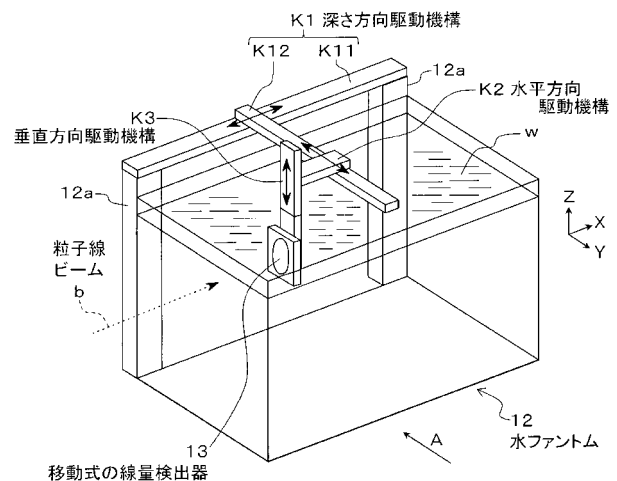
【図1】



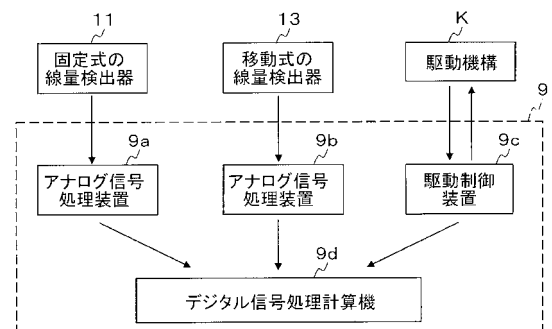
【図2】



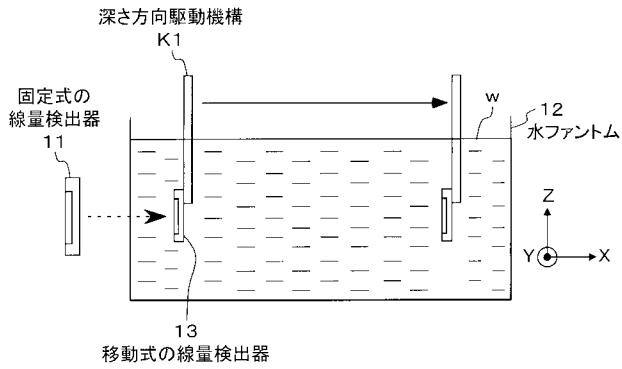
【図3】



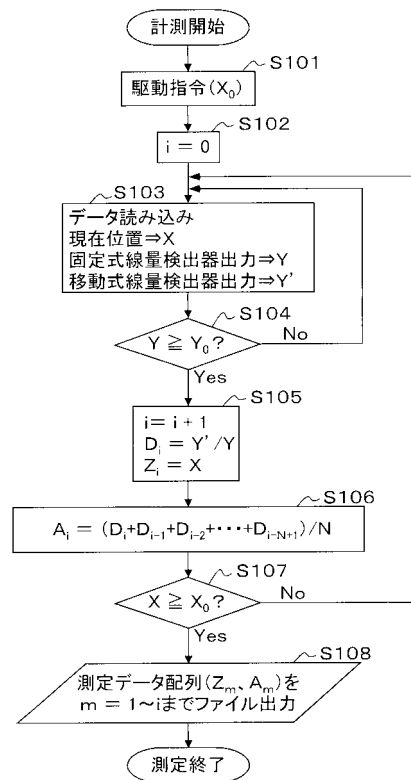
【図4】



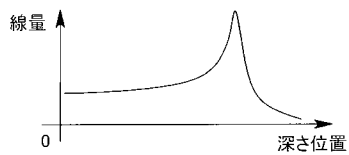
【図 5】



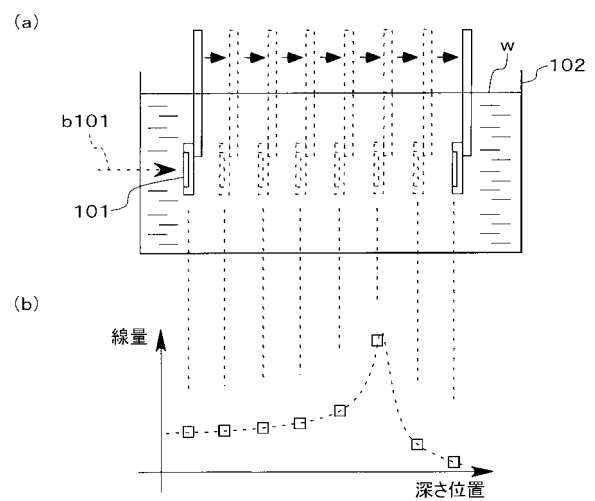
【図 6】



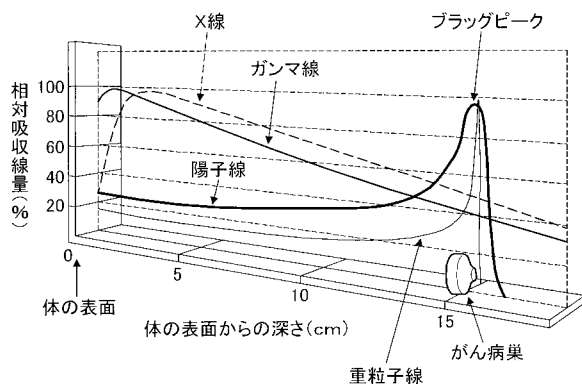
【図 7】



【図 9】



【図 8】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 稲庭 拓  
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 佐藤 眞二  
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 原 洋介  
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内
- Fターム(参考) 4C082 AA01 AC05 AE01 AN03 AP03 AP20